

8. Zusammenfassung

Das automatische Erfassen der Herzschlagrate kann im Herdenmanagement insbesondere für die Erkennung von Abweichungen vom Normalzustand wie Streßzuständen und die Bestimmung der Brunst von praktischem Interesse sein. Es wird deshalb ein Sensor vorgestellt, der auf Infrarotbasis arbeitet und ähnlich wie eine Erkennungsmarke am Ohr des Tieres angebracht wird. Der Aufbau und die elektrische Beschaltung des Ohrpulsensors wird beschrieben. In Hardware und Software ist der Sensor so ausgelegt, daß eine automatische Anpassung an die tierindividuellen Eigenschaften und Verhaltensweisen möglich ist. Zur Unterdrückung zufälliger Fehlimpulse bei der Auswertung der Rohsignale werden Filterfunktionen angegeben. Die Energieversorgung ist im vorgestellten Fall noch für die Zwecke der Versuchstechnik ausgelegt. Eine spätere Minimierung der Schaltung und damit verbunden eine Absenkung des Energieverbrauchs ermöglicht für Praxislösungen einen Batteriebetrieb oder auch eine Einkopplung der Energie analog

den Identifikationsroutinen an Futterstationen. Erste Ergebnisse zum Einsatz des Ohrpulsensors belegen dessen Funktionsfähigkeit und Nützlichkeit im Herdenmanagement.

Schrifttum

- [1] Paul, W. u. H. Speckmann: Die Messung der Milchtemperatur als Mittel zur Überwachung der Tiergesundheit und zur Steuerung des Milchentzuges. *Grundl. Landtechnik* Bd. 29 (1979) Nr. 6, S. 201/208.
- [2] Paul, W., H. Speckmann u. W. Ihle: Die Messung der Leitfähigkeit beim Milchentzug – Meßtechnik und erste Ergebnisse. *Grundl. Landtechnik* Bd. 34 (1984) Nr. 5, S. 192/98.
- [3] Merrick, E.B. u. T.J. Hayes: Continuous non-invasive measurements of arterial blood oxygen levels. *Hewlett-Packard Journal* Bd. 28 (1976) Nr. 2 (Okt.), S. 2/9.
- [4] Patentschrift DE 31 00 610 C2.

Elastizitätsmodul, Kompressibilität und weitere mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten

Von Heinz Dieter Kutzbach, Martin Kustermann und Reinhold Scherer, Stuttgart-Hohenheim*)

DK 633.004.12:531.7

Eine funktionsgerechte Konstruktion von landwirtschaftlichen Maschinen und Anlagen ebenso wie theoretische Untersuchungen des Gutverhaltens erfordern die Kenntnis der entsprechenden Eigenschaften des Gutes. Aufbauend auf früheren Arbeiten zu mechanischen Eigenschaften von Körnerfrüchten [1 bis 7], wird in diesem Beitrag insbesondere über Untersuchungen zur Bestimmung der Kompressibilität und des Elastizitätsmoduls von verschiedenen Körnerfrüchten berichtet. Darüber hinaus werden Gleichungen für die Berechnung der Abmessungen, der Dichte, des Hohlraumvolumens und des Böschungswinkels angegeben. Diese in einer Tafel zusammengefaßten Gleichungen ersetzen entsprechende frühere Angaben [2].

Die Verfasser danken der DFG für die finanzielle Unterstützung zur Durchführung dieser Untersuchungen, Herrn cand. mach. S. Bartel für die Entwicklung der Kompressibilitätsprüfanlage und Frau Dörner-Ibrahim für die exakte Auswertung und Darstellung der Meßwerte.

*) Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach ist Inhaber des Lehrstuhls Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim; Dipl.-Ing. M. Kustermann ist wiss. Mitarbeiter an diesem Lehrstuhl; Dr.-Ing. R. Scherer war wiss. Mitarbeiter an diesem Lehrstuhl und ist jetzt bei der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten tätig.

1. Einleitung

Für die Auslegung und Berechnung von landwirtschaftlichen Maschinen und Anlagen für Ernte, Transport und Aufbereitung von Körnerfrüchten ist der Konstrukteur auf Daten für die physikalischen Eigenschaften dieser Stoffe wie beispielsweise Abmessungen, Dichten, Hohlraumvolumen und Reibbeiwerte angewiesen. Am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim werden deswegen seit längerer Zeit Arbeiten mit dem Ziel durchgeführt, entsprechende Daten bereitzustellen [1 bis 7].

Zunehmend werden diese Daten auch für theoretische Untersuchungen von Stoßvorgängen, Diffusionsvorgängen und für die Simulation des Gutverhaltens benötigt. Für die theoretische Beschreibung der mechanischen Stoffeigenschaften spielt der Elastizitätsmodul, der entsprechend dem Hookeschen Gesetz den Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung angibt, eine entscheidende Rolle. Mohsenin [8] hat verschiedene Methoden zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls zusammengestellt. Theoretische Überlegungen zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls bei nicht vollkommen linearem Zusammenhang zwischen Dehnungen und Spannungen wurden u.a. in [9] dargestellt.

Für theoretische Untersuchungen ist darüber hinaus die Kenntnis der Querkontraktionszahl wichtig. Diese kann jedoch nicht direkt gemessen werden. Im Schrifttum vorliegende Angaben zur Querkontraktionszahl für ganze Körner beziehen sich weitgehend auf eine Arbeit von White [10]. Er kombinierte in seiner Arbeit allerdings Meßergebnisse mit Werten aus dem Schrifttum, um daraus die Querkontraktionszahl zu berechnen, d.h. er benutzte Stoffwerte, die von unterschiedlichen Proben stammten. Um diesen methodischen Nachteil zu umgehen, wurden in der hier vorgestellten Arbeit Elastizitätsmodul und Kompressibilität an Proben vom gleichen Standort zu gleicher Zeit bestimmt und daraus die Querkontraktionszahl berechnet.

Neben der Angabe von Daten und Abhängigkeiten für diese drei Größen wird kurz über den theoretischen Zusammenhang und über die benutzten Versuchseinrichtungen zur Bestimmung der Kompressibilität berichtet.

2. Elastizitätsmodul, Kompressibilität, Querkontraktionszahl

2.1 Theoretische Grundlagen

Ausgangspunkt für die Ermittlung der Querkontraktionszahl ist der physikalische Zusammenhang zwischen Kompressibilität κ , Querkontraktionszahl μ und Elastizitätsmodul E :

$$\mu = 0,5 - E \kappa / 6 \quad (1).$$

Aus dieser Gleichung kann die Querkontraktionszahl berechnet werden, wenn die Kompressibilität und der Elastizitätsmodul an Material aus derselben Charge und mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können.

Die Kompressibilität κ gibt die Volumenabnahme der Probe aufgrund einer Druckerhöhung bei konstanter Temperatur an

$$\kappa = - \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (2).$$

V_0 bezeichnet das Ausgangsvolumen, ΔV (negativ) die Volumenabnahme und Δp die zugehörige Druckerhöhung.

Der Elastizitätsmodul E kennzeichnet nach dem *Hookeschen* Gesetz

$$\sigma = E \epsilon \quad (3)$$

den grundlegenden mathematischen Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen für homogenes, isotropes Material im elastischen Bereich. Es wird vorausgesetzt, daß Gl. (3) auch für die hier untersuchten ganzen Körner von Getreide und Mais bei geringen Verformungen gilt.

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls erfolgte auf einer Instron-Universalprüfmaschine, indem das Korn von einem Prüfstempel bzw. einer Prüfplatte bei konstanter Geschwindigkeit von 0,5 cm pro min verformt wird und dabei die Verformungskraft ΔF und der Verformungsweg Δd gemessen werden. Unter der Voraussetzung, daß die Querkontraktionszahl μ und die Geometrie der Kontaktstelle bekannt sind, kann der Elastizitätsmodul aus der Verformung des Kornes Δd und der Verformungskraft ΔF nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$E = \frac{1,061 (1 - \mu^2)}{\pi} \sqrt{\frac{K^3}{R}} \sqrt{\frac{(\Delta F)^2}{(\Delta d)^3}} \quad (4).$$

Diese Beziehung basiert auf der Theorie von *Hertz*. K ist eine Konstante, die die Geometrie der Versuchsanordnung berücksichtigt, und R ein Maß für die Krümmungsradien des Druckstempels (R_1) und des untersuchten Kornes (R_2) entsprechend

$$1/R = 2/R_1 + 2/R_2 \quad (5).$$

Nach *Kozma u. Cunningham* [11] beträgt $K = 1,346$ bis $1,351$ für $R_1 = 0,825$ mm. Bei einem Druckversuch mit einer flachen Platte als Druckstempel hat K Werte zwischen $1,130$ und $1,351$, wenn der Radius R_2 des untersuchten Kornes größer als 3 mm ist.

Durch Einsetzen von Gl. (1) und (2) in (4) erhält man

$$E = \frac{1,061 [1 - (0,5 - E \kappa / 6)^2]}{\pi} \sqrt{\frac{K^3}{R}} \sqrt{\frac{(\Delta F)^2}{(\Delta d)^3}} \quad (6).$$

Mit

$$C = \frac{1,061}{\pi} \sqrt{\frac{K^3}{R}} \sqrt{\frac{(\Delta F)^2}{(\Delta d)^3}} \quad (7)$$

läßt sich diese Gleichung umformen in

$$E = \left[\frac{\kappa C}{6} - 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{\kappa C}{6}\right)^2 + \frac{\kappa^2 C^2}{12}} \right] / \frac{\kappa^2 C}{18} \quad (8).$$

Mit dieser Gleichung ist es möglich, den Elastizitätsmodul E über die einzelnen Größen ΔF und Δd aus dem Druckversuch und ΔV und Δp aus dem Kompressionsversuch zu bestimmen.

Während in früheren Arbeiten der im Druckversuch ermittelte Zusammenhang zwischen ΔF und Δd linearisiert wurde [12, 13], ist bei den hier berichteten Ergebnissen die gemessene Kraft-Deformationskurve durch eine der *Hertz*schen Theorie entsprechende Funktion

$$\Delta F = a \Delta d^{3/2} \quad (9)$$

angenähert. Die Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen ist besser als bei einer Linearisierung der Kraft-Deformationskurve. Die Konstante a wurde bestimmt, indem nach einer Verformung von $d = 0,07$ mm die zugehörige Kraft F durch $d^{3/2}$ dividiert wurde. Dieser Wert a wurde dann in Gl. (7) zur Bestimmung der Konstanten C eingesetzt.

2.2 Versuchsmethode und -durchführung

2.2.1 Kompressibilitätsprüfanlage

Die Bestimmung der Kompressibilität nach Gl. (2) setzt eine Belastung durch einen allseitig wirkenden Druck voraus. Für die in Hohenheim entwickelte Kompressibilitätsprüfanlage wird Mineralöl als Druckmedium verwendet, da es nicht wie Wasser zu Feuchteänderungen im Gut führt. Es hat gegenüber Luft als Druckmedium den Vorteil, daß es offene Poren der Körnerfrüchte nicht ausfüllt und dadurch auch die offenen Poren zur Volumenänderung beitragen, wie es beispielsweise bei der Belastung der Körner in Silos durch das Eigengewicht ebenfalls der Fall ist.

Für die Konstruktion ergeben sich folgende zusätzliche Anforderungen:

- Druckbereich bis 20 bar
- möglichst steife Ausführung
- möglichst inkompressibles Druckmedium
- Entlüftungsmöglichkeit zur Abscheidung von Luftblasen.

Bild 1 zeigt ein Schema der Kompressibilitätsprüfanlage. Sie besteht aus dem eigentlichen Druckbehälter mit einem Innendurchmesser von 137 mm und einer Höhe von 212 mm. Die Druckmessung erfolgt über einen am Druckbehälter angebrachten Druckaufnehmer. Die Volumenänderung, die sich aus den Volumenverringern der untersuchten Probe und des Öls sowie einer elastischen Volumenvergrößerung des Drucktopfes zusammensetzt, wird über einen Verdrängerkolben bestimmt.

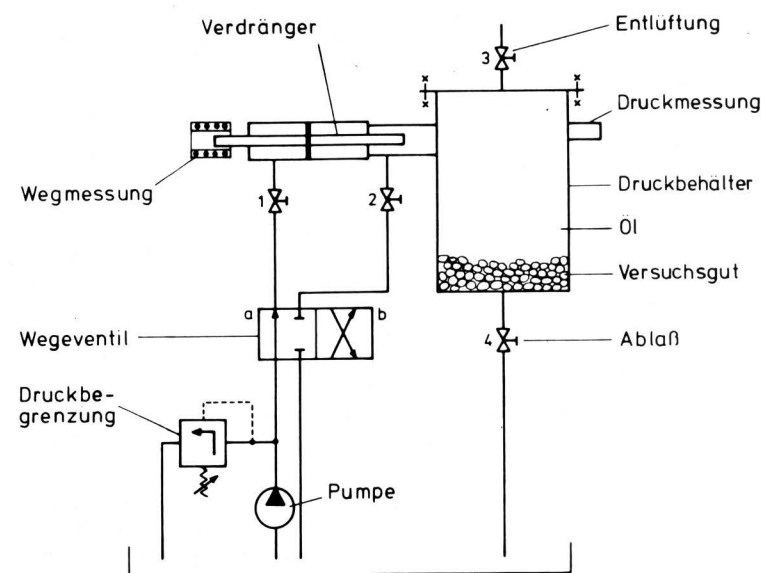


Bild 1. Schema der Versuchsanlage zur Bestimmung der Kompressibilität.

2.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit Sommergerste, Winterweizen, Hafer und Mais durchgeführt. Die für die Versuche benötigte Gutmenge wurde am Morgen des Versuchstages geerntet, und dann wurden sowohl die Kompressibilitätsuntersuchung wie die Druckversuche zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls vorgenommen. Der für die Versuche benötigte Mais mit Feuchtegehalten unter 28 % wurde auf einer Belüftungstrocknungsanlage mit Raumlufttemperatur auf den gewünschten Feuchtegehalt getrocknet.

Nach dem Einfüllen des Gutes und Schließen des Druckbehälters wird dieser entlüftet (Wegeventil in Stellung b, Hähne 2 und 3 geöffnet, Hahn 4 geschlossen). Treten keine Luftblasen mehr aus, kann mit der Messung begonnen werden. Dazu werden die Hähne 2, 3 und 4 geschlossen und das Wegeventil in Stellung a gebracht. Durch den auf der linken Seite des Hydraulikzylinders aufgebracht Druck schiebt sich der Verdränger in den Druckbehälter. Der dabei im Behälter entstehende Druck wird mittels eines Druckaufnehmers gemessen. Da der Verdränger eine bekannte, gleichbleibende Querschnittsfläche A hat, ist der Verschiebeweg s der Volumenänderung ΔV direkt proportional. Der Druck im Zylinder wird so lange erhöht, bis entweder der Druck im Behälter den vorgegebenen Maximalwert von 20 bar oder die Kolbenstange den maximalen Verschiebeweg erreicht. Durch Umschalten des Wegeventils (Stellung b) und evtl. Öffnen des Hahnes 2, kann der Verdränger wieder in die Ausgangsstellung gebracht werden.

Das Ausgangsvolumen V_0 des Gutes wird vor dem Einfüllen dadurch ermittelt, daß es vorsichtig unter Vermeidung von Luftblasen in ein hohes, teilweise mit Öl gefülltes Becherglas gegeben wird. Die Änderung der Höhe des Flüssigkeitsspiegels entspricht dem Gutvolumen.

Bei der Versuchsdurchführung zeigte sich, daß es aufgrund von Umwelteinflüssen notwendig ist, die Anlage vor bzw. nach jedem Versuch neu zu kalibrieren. Dies geschieht dadurch, daß statt des Gutes eine volumengleiche Menge Stahl in den Druckbehälter gegeben wird. Die Kompressibilität von Stahl ist gegenüber der von Körnerfrüchten vernachlässigbar klein.

Während des Versuches, der bei konstanter Raumtemperatur durchzuführen ist, werden direkt Druck-Weg-Kurven $p = f(s)$ aufgezeichnet, die wegen der direkten Proportionalität zwischen Verdrängerweg und Volumenabnahme gleichzeitig Druck-Volumen-Verläufe $p = f(V)$ sind. Aus diesen Kurven wurde für ein vorgewähltes Δp von 8 auf 13 bar die zugehörige Volumenänderung ΔV_{Vers} abgelesen. Zur Berücksichtigung der elastischen Verformung des Druckbehälters und der Kompressibilität des Mineralöls wurde von diesem Wert die Volumenänderung im gleichen Druckbereich während der Kalibration ΔV_{Kal} abgezogen und damit die eigentliche Volumenänderung ΔV der eingefüllten Körnerprobe ermittelt.

2.3 Versuchsergebnisse

Während mit der vorgestellten Meßmethode bei den Untersuchungen an Mais, Gerste und Weizenkörnern gute Ergebnisse erzielt werden konnten, arbeitete das Meßverfahren bei Hafer unzureichend. Die große Luftmenge, die bei Hafer zwischen festsitzenden Spelzen und Körnern eingeschlossen ist, führte dazu, daß einerseits übergroße Werte für die Kompressibilität ermittelt wurden und andererseits fortlaufend Luft aus dem Zwischenraum zwischen Korn und Spelze in das umgebende Öl entwich, also keine einwandfreie Entlüftung des Meßbehälters möglich war.

Die Kompressibilität wurde zu zwei Zeitpunkten bestimmt. Einmal direkt nach dem Einfüllen des Gutes in den Druckbehälter und zum zweiten Mal, nachdem das Gut 15 Stunden unter Druck gestanden hatte. Für den ersten Test wurde gerade so lange gewartet, daß beim Durchspülen des Behälters keine Luftblasen im Ölstrom mehr beobachtet wurden. Die Resultate beider Messungen unterscheiden sich zum einen darin, daß nach der längeren Wartezeit kleinere Werte für die Kompressibilität bestimmt werden. Zum

anderen verschwand bei Gerste und Weizen der Einfluß des Feuchtegehaltes, der beim ersten Test eine Zunahme der Kompressibilität mit dem Feuchtegehalt bedeutete. Diese Beobachtung wird darauf zurückgeführt, daß während der Wartezeit eventuell eine geringfügige Ölmenge in die trockenen Körner eindringt und daß aus den feuchten Körnern in dieser Zeitspanne etwas Feuchte austritt.

Bei der Untersuchung von Maiskörnern wurde dieser Effekt nicht registriert. Das Verhalten der im Vergleich zu Getreidekörnern wesentlich größeren Maiskörner wird durch Einflüsse bzw. Änderungen der Eigenschaften der Randzone wesentlich weniger beeinflusst, als dies bei den viel kleineren Getreidekörnern der Fall ist.

Im folgenden werden die Werte dargestellt, die kurz nach dem Einfüllen des Gutes in den Druckbehälter ermittelt worden sind.

2.3.1 Kompressibilität

Der Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Kompressibilität ist in Bild 2 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist eine Zunahme der Kompressibilität mit zunehmendem Feuchtegehalt, die besonders bei Mais stark ausgeprägt ist. Bei der gewählten Druckerhöhung von 5 bar entspricht ein Wert der Kompressibilität von $10 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$ pro N einer Volumenänderung von 0,5 %. Während sich die Ergebnisse der beiden Getreidearten Weizen und Gerste kaum voneinander unterscheiden, liegt die Kompressibilität von Mais bei geringen Feuchtegehalten unterhalb der von Getreide, bei höheren Feuchtegehalten deutlich darüber. Mais wird mit zunehmendem Feuchtegehalt also wesentlich kompressibler. Da Wasser, wie alle Flüssigkeiten, nahezu inkompressibel ist, kann die Zunahme der Kompressibilität nur auf eine dementsprechende Änderung der Eigenschaften des Maiskorns zurückgeführt werden.

Über die Art dieser Änderung existieren lediglich Vermutungen: die leichtere Verschiebbarkeit längerer Moleküle bei feuchten und damit weichen Körnern ist eine Erklärung, eine andere Erklärung führt die Kompressibilitätszunahme auf die größere innerhalb des Kornes in der Zellflüssigkeit gelöste Gasmenge zurück. Da bei feuchten Körnern eine wesentlich größere Atmungstätigkeit vorliegt und die dabei anfallenden gasförmigen Stoffwechselprodukte im Korninneren entstehen, spielt dieser Vorgang mit Sicherheit eine gewisse Rolle.

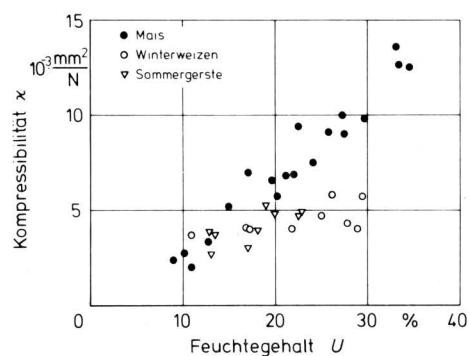


Bild 2. Kompressibilität für Mais, Winterweizen und Sommergerste in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

2.3.2 Elastizitätsmodul

Die Werte für den Elastizitätsmodul in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Körner sind in Bild 3 für Weizen und Gerste und in Bild 4 für Mais enthalten. Wie aus den Bildern zu ersehen ist, nehmen die Werte für den Elastizitätsmodul mit zunehmendem Feuchtegehalt ab. Dabei ist dieser Einfluß bei Weizen größer als bei Gerste. Die Werte für Mais sind etwa 3–4mal so groß wie die für Getreide. Die Ergebnisse stimmen in etwa mit den Werten anderer Autoren [8] überein.

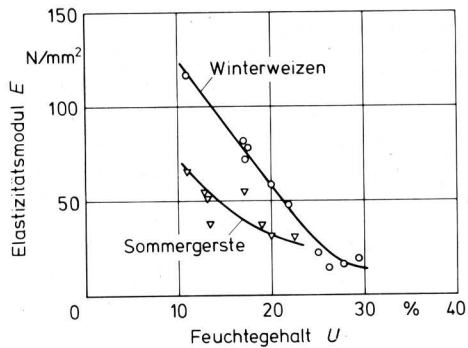


Bild 3. Elastizitätsmodul für Winterweizen und Sommergerste in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

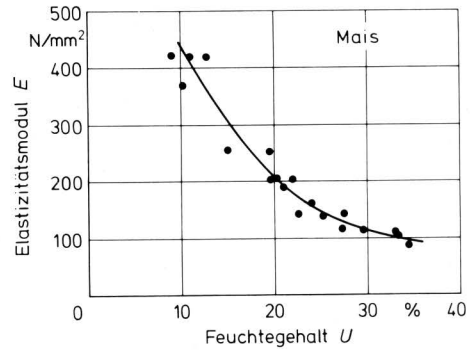


Bild 4. Elastizitätsmodul für Mais in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

2.3.3 Querkontraktionszahl

Die für die Querkontraktionszahl aus den Versuchsergebnissen berechneten Werte sind in Bild 5 dargestellt. Der Feuchtegehalt hat auf die Querkontraktionszahl wegen der gegenläufigen Änderungen von Elastizitätsmodul und Kompressibilität mit dem Feuchtegehalt nur einen geringen Einfluß.

Für die Berechnung der Querkontraktionszahl μ ist es wichtig, daß die Kompressibilität sehr genau bestimmt wird, da sie die Größe der Querkontraktionszahl direkt beeinflusst. Dagegen ist der Einfluß der Kompressibilität auf den Elastizitätsmodul nur gering ausgeprägt.

Gutart	Sorte	Ernte-jahr	Gültigkeitsbereich für X	Kornlänge L_K mm	Kornbreite B_K mm	Korndicke D_K mm	Äquivalenter Kugeldurchmesser d_K mm	Mittl. Kornmasse m_K g
Sommergerste	Carina	1974	0,02–0,15					
		1975	0,03–0,17	$L_K = 7,6$ $s_r = 1,8 \%$	$B_K = 3,4 + 0,78 X$ $r = 0,42$	$D_K = 2,7$ $s_r = 1,6 \%$	$d_K = 3,7 + 0,95 X$ $r = 0,84$	$m_K = 0,038 + 0,023 X$ $r = 0,80$
		1976	0,05–0,22	$L_K = 7,0$ $s_r = 2,2 \%$	$B_K = 3,1 + 0,65 X$ $r = 0,47$	$D_K = 2,3 + 1,12 X$ $r = 0,80$	$d_K = 3,5 + 1,24 X$ $r = 0,93$	$m_K = 0,0296 + 0,034 X$ $r = 0,93$
Wintergerste	Dura	1976	0,06–0,17	$L_K = 7,6 + 2,59 X$ $r = 0,41$	$B_K = 3,0 + 2,59 X$ $r = 0,83$	$D_K = 2,4 + 1,56 X$ $r = 0,49$	$d_K = 3,7 + 0,67 X$ $r = 0,93$	$m_K = 0,0401 + 0,005 X$ $r = 0,75$
Hafer	Tiger	1976	0,06–0,16	$L_K = 8,6$ $s_r = 7,0 \%$	$B_K = 2,4$ $s_r = 3,9 \%$	$D_K = 1,9$ $s_r = 6,1 \%$	$d_K = 3,1 + 1,05 X$ $r = 0,76$	$m_K = 0,0199 + 0,026 X$ $r = 0,80$
Roggen	Petkuser	1975	0,05–0,15	$L_K = 6,7 + 2,19 X$ $r = 0,51$	$B_K = 2,4 + 2,23 X$ $r = 0,76$	$D_K = 2,4 + 2,08 X$ $r = 0,99$	$d_K = 3,4 + 0,56 X$ $r = 0,66$	$m_K = 0,028 + 0,014 X$ $r = 0,59$
		1976	0,05–0,16	$L_K = 6,7$ $s_r = 1,9 \%$	$B_K = 2,4$ $s_r = 1,6 \%$	$D_K = 2,3 + 0,83 X$ $r = 0,60$	$d_K = 3,2 + 0,96 X$ $r = 0,89$	$m_K = 0,0245 + 0,023 X$ $r = 0,93$
Sommerweizen	Colibri	1975	0,05–0,25	$L_K = 5,2 + 0,92 X$ $r = 0,74$	$B_K = 3,3 + 1,45 X$ $r = 0,90$	$D_K = 2,8 + 1,37 X$ $r = 0,92$	$d_K = 3,7 + 1,02 X$ $r = 0,96$	$m_K = 0,0352 + 0,025 X$ $r = 0,94$
		1976	0,05–0,25	$L_K = 5,2 + 1,31 X$ $r = 0,69$	$B_K = 2,6 + 1,67 X$ $r = 0,91$	$D_K = 2,3 + 1,19 X$ $r = 0,80$	$d_K = 3,2 + 1,67 X$ $r = 0,99$	$m_K = 0,0243 + 0,039 X$ $r = 0,86$
Winterweizen	Jubilar	1974	0,01–0,18					
		1975	0,03–0,30	$L_K = 6,1 + 0,12 X$ $r = 0,94$	$B_K = 3,6 + 0,40 X$ $r = 0,42$	$D_K = 3,1 + 0,24 X$ $r = 0,46$	$d_K = 3,8 + 1,55 X$ $r = 0,95$	$m_K = 0,0419 + 0,041 X$ $r = 0,97$
		1976	0,07–0,20	$L_K = 5,9 + 0,98 X$ $r = 0,60$	$B_K = 3,4$ $s_r = 1,7 \%$	$D_K = 2,8 + 0,97 X$ $r = 0,64$	$d_K = 3,7 + 1,42 X$ $r = 0,98$	$m_K = 0,0376 + 0,044 X$ $r = 0,98$
Mais	Inra 258	1974	0,05–0,85	$L_K = 9,8 + 1,31 X$ $r = 0,81$	$B_K = 8,5 + 1,26 X$ $r = 0,88$	$D_K = 4,8 + 0,78 X$ $r = 0,86$	$d_K = 7,0 + 2,05 X$ $r = 0,99$	$m_K = 0,23 + 0,02 X^2 + 0,22 X$ $r = 0,99$
		1975	0,05–0,54	$L_K = 10,7 + 0,43 X$ $r = 0,44$	$B_K = 8,6 + 1,77 X$ $r = 0,98$	$D_K = 4,8 + 1,06 X$ $r = 0,91$		$m_K = 0,259 - 0,38 X^2 + 0,49 X$ $r = 0,99$
	Prior	1975	0,05–0,54	$L_K = 10,6$ $s_r = 0,9 \%$	$B_K = 9,6 + 0,84 X$ $r = 0,66$	$D_K = 5,0 + 0,71 X$ $r = 0,78$		$m_K = 0,322 + 0,26 X^2 + 0,16 X$ $r = 0,99$
	Brilliant	1975	0,05–0,54	$L_K = 9,8 + 0,87 X$ $r = 0,85$	$B_K = 9,3 + 1,09 X$ $r = 0,59$	$D_K = 4,7 + 1,43 X$ $r = 0,95$		$m_K = 0,288 - 0,24 X^2 + 0,41 X$ $r = 0,99$
	Opaque-2	1975	0,05–0,25	$L_K = 9,5 + 5,55 X$ $r = 0,83$	$B_K = 7,7 + 2,67 X$ $r = 0,74$	$D_K = 3,95 + 4,20 X$ $r = 0,94$		$m_K = 0,266 + 1,26 X^2 - 0,15 X$ $r = 0,88$
Winter-raps	Diamant	1976	0,05–0,17				$d_K = 1,8$ (gemessen) $s_r = 2,6 \%$	$m_K = 0,0045 + 0,005 X$ $r = 0,90$

Tafel 2. Gleichungen zur Berechnung der Werte einzelner physikalischer Eigenschaften in Abhängigkeit vom Feuchtegrad.

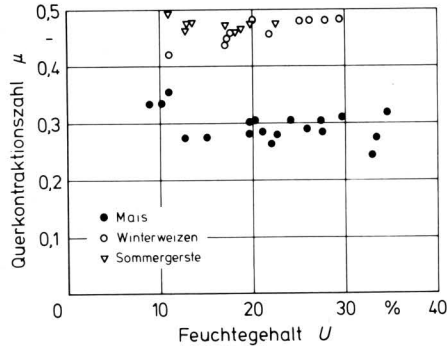


Bild 5. Querkontraktionszahl für Mais, Winterweizen und Sommergerste in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

3. Abmessungen, Dichte, Hohlraumvolumen

3.1 Charakterisierung des Versuchsgutes

Die Bestimmung dieser physikalischen Stoffeigenschaften wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 140 mit Körnerfrüchten aus den Jahren 1974 bis 1976 durchgeführt. Die einzelnen Versuchseinrichtungen sind ausführlich erläutert worden [1, 2], so daß auf eine erneute Beschreibung verzichtet werden kann.

Bei allen Versuchen wurde naturfeuchtes mit dem Mährescher geerntetes und mit einer Reinigungsanlage gereinigtes Gut verwendet. Die Trocknung der Gutsproben auf den jeweiligen Feuchtegehalt erfolgte mit einer Belüftungstrocknungsanlage bei Raumtemperatur und Schichthöhe von 5 cm.

Die im einzelnen untersuchten Körnerfruchtarten und Sorten sind in Tafel 1 zusammengestellt. Diese Tafel enthält auch die das Gut charakterisierenden Kornabmessungen. Sie sind bis auf den äquivalenten Korndurchmesser identisch mit den in [2] (dort Tafel 1) angegebenen Werten. Die hier abgedruckte Tafel mit neu berechneten Werten für den äquivalenten Kugeldurchmesser soll nun die frühere Tafel ersetzen.

3.2 Einfluß des Feuchtegrads auf physikalische Stoffeigenschaften

Bis auf wenige Ausnahmen schrumpfen die einzelnen Körner mit abnehmendem Feuchtegrad, so daß die Körner mit geringerem Feuchtegrad kleinere Abmessungen haben als solche mit hohem Feuchtegrad desselben Versuchsgutes. Die vorliegenden Versuchsergebnisse ließen sich mit Regressionsanalysen durch Geraden gut erfassen. Die Gleichungen sind im einzelnen in Tafel 2 zusammengestellt. Die in dieser Tafel ebenfalls enthaltenen Gleichungen für den äquivalenten Kugeldurchmesser und das mittlere Kornvolumen wurden neu berechnet und ersetzen die in [2] enthaltenen Gleichungen.

Mittl. Kornvolumen V_K cm^3	Reindichte ρ kg/m^3	Schüttdichte ρ_S kg/m^3	Hohlraumvolumen ϵ_S m^3/m^3	Böschungswinkel a_S $^\circ$
		$\rho_S = 649,2 - 900,7 X^2 + 344,2 X; r = 0,79$	$\epsilon_S = 0,526 - 0,165 X^2 - 0,063 X; r = 0,64$	$a_S = 26,5 + 42,9 X^2 - 18,3 X; r = 0,67$
$V_K = 0,0267 + 0,022 X; r = 0,83$	$\rho = 1419 - 185,3 X; r = 0,75$	$\rho_S = 730,1 - 529,5 X^2 - 107,9 X; r = 0,94$	$\epsilon_S = 0,477 - 0,53 X^2 + 0,199 X; r = 0,83$	$a_S = 20,9 - 154,8 X^2 + 45,7 X; r = 0,87$
$V_K = 0,0227 + 0,027 X; r = 0,93$	$\rho = 1299 - 49,2 X; r = 0,59$	$\rho_S = 642,2 - 1226 X^2 + 260 X; r = 0,93$	$\epsilon_S = 0,502 + 0,624 X^2 - 0,139 X; r = 0,80$	$a_S = 25,3 + 118,2 X^2 - 22,9 X; r = 0,82$
$V_K = 0,0273 + 0,016 X; r = 0,92$	$\rho = 1383; s_r = 0,3 \%$	$\rho_S = 639,9 - 746,1 X^2 + 86,6 X; r = 0,70$	$\epsilon_S = 0,528 - 0,284 X^2 + 0,124 X; r = 0,63$	$a_S = 24,9 - 268,2 X^2 + 65,2 X; r = 0,56$
$V_K = 0,0155 + 0,017 X; r = 0,75$	$\rho = 1344; s_r = 0,8 \%$	$\rho_S = 525,8 - 686,1 X^2 + 348,5 X; r = 0,92$	$\epsilon_S = 0,606 + 0,267 X^2 - 0,198 X; r = 0,89$	$a_S = 30,8 + 142,4 X^2 - 30,5 X; r = 0,88$
$V_K = 0,020 + 0,012 X; r = 0,71$	$\rho = 1417 - 107,3 X; r = 0,60$	$\rho_S = 739,7 - 747,6 X^2 + 154,9 X; r = 0,64$	$\epsilon_S = 0,456 - 2,2 X^2 + 0,37 X; r = 0,66$	$a_S = 22,2 - 126,7 X^2 + 11,2 X; r = 0,76$
$V_K = 0,0169 + 0,0169 X; r = 0,96$	$\rho = 1442 - 50,9 X; r = 0,67$	$\rho_S = 732,7 - 3239 X^2 + 631,2 X; r = 0,81$	$\epsilon_S = 0,491 + 2,031 X^2 - 0,414 X; r = 0,63$	$a_S = 29,0 + 445,3 X^2 - 106,7 X; r = 0,94$
$V_K = 0,0256 + 0,023 X; r = 0,97$	$\rho = 1371 - 209,6 X; r = 0,99$	$\rho_S = 733,5 - 2629 X^2 + 513,1 X; r = 0,98$	$\epsilon_S = 0,464 + 1,87 X^2 - 0,44 X; r = 0,96$	$a_S = 28,8 + 409,6 X^2 - 96,5 X; r = 0,96$
$V_K = 0,0169 + 0,029 X; r = 0,96$	$\rho = 1435 - 243,4 X; r = 0,87$	$\rho_S = 738,7 - 980 X^2 + 216 X; r = 0,91$	$\epsilon_S = 0,468 - 0,274 X^2 + 0,033 X; r = 0,83$	$a_S = 29,3 + 296,8 X^2 - 76,2 X; r = 0,86$
		$\rho_S = 733,4 + 2573 X^2 - 184,9 X; r = 0,96$	$\epsilon_S = 0,456 - 1,56 X^2 + 0,115 X; r = 0,88$	$a_S = 26,3 - 122,3 X^2 + 9,67 X; r = 0,97$
$V_K = 0,0296 + 0,034 X; r = 0,97$	$\rho = 1413 - 193,4 X; r = 0,88$	$\rho_S = 775,1 - 1324 X^2 + 231,9 X; r = 0,80$	$\epsilon_S = 0,446 + 0,605 X^2 - 0,14 X; r = 0,54$	$a_S = 24,8 + 170,8 X^2 - 32,0 X; r = 0,80$
$V_K = 0,0267 + 0,039 X; r = 0,97$	$\rho = 1379 - 126,8 X; r = 0,80$	$\rho_S = 703,9 - 3226 X^2 + 895 X; r = 0,96$	$\epsilon_S = 0,486 + 2,2 X^2 - 0,654 X; r = 0,87$	$a_S = 26,2 + 191,0 X^2 - 54,9 X; r = 0,56$
$V_K = 0,175 + 0,03 X^2 + 0,18 X; r = 0,99$	$\rho = 1353 + 78,4 X^2 - 179,4 X; r = 0,99$	$\rho_S = 661,4 + 630,1 X^3 - 464,0 X^2 + 20,4 X; r = 0,91$	$\epsilon_S = 0,513 - 0,56 X^3 + 0,48 X^2 - 0,11 X; r = 0,96$	$a_S = 22,2 - 112,4 X^3 + 99,5 X^2 + 3,87 X; r = 0,96$
		$\rho_S = 732,9 + 2097 X^3 - 1301 X^2 + 55,8 X; r = 0,99$		$a_S = 23,8 - 288,6 X^3 + 228,9 X^2 - 32,5 X; r = 0,99$
		$\rho_S = 728,6 + 6004 X^3 - 4822 X^2 + 862,5 X; r = 1,00$		$a_S = 25,5 - 374,4 X^3 + 295,3 X^2 - 45,7 X; r = 0,99$
		$\rho_S = 774,8 + 2004 X^3 - 1291 X^2 + 20,6 X; r = 0,99$		$a_S = 25,5 - 379,5 X^3 + 299,3 X^2 - 46,4 X; r = 0,99$
		$\rho_S = 703,3 - 727 X^3 - 1720 X^2 + 366 X; r = 0,96$		$a_S = 25,6 + 69,5 X^3 + 386,2 X^2 - 88,7 X; r = 0,90$
$V_K = 0,0039 + 0,006 X; r = 0,85$	$\rho = 1126 - 63,2 X; r = 0,52$	$\rho_S = 695,2 + 118 X^2 - 141 X; r = 0,83$	$\epsilon_S = 0,373 - 0,82 X^2 + 0,27 X; r = 0,67$	$a_S = 22,3 + 11,9 X^2 - 6,3 X; r = 0,89$

Gutart	Sorte	Ernte- jahr	L _K mm	B _K mm	D _K mm	L _K : B _K : D _K	L _K : B _K	äquiv. Kugel ϕ d _K mm	Tausend- korn- masse g	Reindichte ρ kg/m ³
Sommer- gerste	Carina	1975	7,6	3,6	2,7	2,82 : 1,32 : 1	2,11 : 1	3,8	41,3	1386
		1976	7,1	3,1	2,5	2,90 : 1,28 : 1	2,29 : 1	3,7	33,5	1295
Winter- gerste	Dura	1976	8,4	3,5	2,7	3,09 : 1,28 : 1	2,4 : 1	3,8	41,3	1380
Hafer	Tiger	1976	7,8	2,3	1,9	4,11 : 1,23 : 1	3,39 : 1	3,3	24,6	1313
Roggen	Petkuser	1975	7,1	2,6	2,6	2,72 : 1,0 : 1	2,73 : 1	3,4	29,7	1401
		1976	6,5	2,4	2,4	2,75 : 1,0 : 1	2,71 : 1	3,3	27,9	1435
Sommer- weizen	Colibri	1975	5,3	3,5	3,0	1,76 : 1,16 : 1	1,51 : 1	3,8	39,7	1337
		1976	5,5	2,9	2,6	1,89 : 1,12 : 1	1,90 : 1	3,5	31,1	1402
Winter- weizen	Jubilar	1975	6,2	3,7	3,2	1,95 : 1,17 : 1	1,68 : 1	4,0	47,4	1380
		1976	6,1	3,4	3,0	2,08 : 1,15 : 1	1,79 : 1	4,0	44,8	1357
Mais	Inra 258	1974	10,2	8,7	4,8	2,10 : 1,79 : 1	1,17 : 1	7,3	267,2	1300
		1975	10,7	9,0	5,0	2,16 : 1,80 : 1	1,19 : 1	7,8	316,0	1337
	Prior	1975	10,6	9,7	5,0	2,13 : 1,95 : 1	1,09 : 1	8,0	360,0	1312
	Anjou	1975	9,9	8,4	4,9	2,01 : 1,70 : 1	1,18 : 1	7,4	316,0	1371
	Brillant	1975	10,0	9,5	4,7	2,12 : 2,02 : 1	1,05 : 1	7,7	340,0	1322
	Opaque-2	1975	10,9	8,3	4,8	2,26 : 1,72 : 1	1,31 : 1	7,6	289,0	1266
Winter- raps	Diamant	1976	1,8	1,8	1,8			1,8 gemessen	5,69	1119

Tafel 1. Kenndaten des Versuchsgutes bei einem Feuchtegrad von X = 0,15.

Da sich mit dem Feuchtegrad auch die Reibeigenschaften zwischen den Körnern ändern, s. die Gleichungen für den Böschungswinkel in Tafel 2, ist der Einfluß des Feuchtegrades auf Schüttdichte und Hohlraumvolumen nur durch Gleichungen höherer Ordnung zu erfassen. Sie sind für die verschiedenen Körnerfrüchte ebenfalls in Tafel 2 zusammengestellt.

4. Zusammenfassung

Im ersten Teil dieses Beitrages wird über ein Meßverfahren zur Bestimmung der Kompressibilität berichtet. Aus Kompressibilität und Elastizitätsmodul wird die Querkontraktionszahl berechnet. Der Elastizitätsmodul wird dabei am gleichen Probenmaterial mit einer Instron-Prüfmaschine bestimmt. Der Einfluß des Feuchtegehaltes auf diese drei mechanischen Stoffeigenschaften wird für Mais, Weizen und Gerste angegeben. Die für diese Untersuchung entwickelte Kompressibilitätsmeßeinrichtung hat sich bei diesen Untersuchungen bewährt. Allerdings muß bei den Messungen sehr sorgfältig vorgegangen und die Umgebungstemperatur konstant gehalten werden. Durch ein mit der Zeit zunehmendes Eindringen des für die Versuche benutzten Öls in die Poren der Körnerfrüchte verändern sich deren mechanische Stoffeigenschaften nach einer längeren Verweilzeit im Ölbad.

Im zweiten Teil dieses Beitrages werden Gleichungen für den Einfluß des Feuchtegrades auf Abmessungen, Kornmasse, Dichte, Hohlraumvolumen und Böschungswinkel für verschiedene Körnerfruchtarten und Sorten mehrerer Erntejahre angegeben, die entsprechende Daten einer früheren Arbeit [2] ersetzen.

Verwendete Formelzeichen

a	–	Konstante
B _K	mm	Kornbreite
C	–	Konstante nach Gl. (7)
D _K	mm	Korndicke
d	mm	Deformation
d _K	mm	äquivalenter Kugeldurchmesser
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
K	–	Konstante nach Kozma u. Cunningham
L _K	mm	Kornlänge
m _K	g	mittlere Kornmasse
p	N/mm ²	Druck
R	mm	Krümmungsradius
R ₁	mm	Krümmungsradius des Druckstempels
R ₂	mm	Krümmungsradius des untersuchten Kornes
s	mm	Verdrängungsweg
U	%	Feuchtegehalt
V ₀	cm ³	Ausgangsvolumen
ΔV	cm ³	Volumenänderung
V _K	cm ³	Kornvolumen
X	kg/kg	Feuchtegrad
α_s	°	Böschungswinkel
ϵ	–	Dehnung
ϵ_s	m ³ /m ³	Hohlraumvolumen
κ	mm ² /N	Kompressibilität
μ	–	Querkontraktionszahl
ρ	kg/m ³	Reindichte
ρ_s	kg/m ³	Schüttdichte
σ	N/mm ²	Spannung

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Segler, G. u. R. Scherer: Systematische Untersuchungen über einige physikalische Kenngrößen des Getreidekorns in Abhängigkeit vom Feuchtegrad am Beispiel der Maissorte Inra 258.
Grundl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 4, S. 121/28.
- [2] Scherer, R. u. H.D. Kutzbach: Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten.
Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 1, S. 6/12.
- [3] Kutzbach, H.D. u. R. Scherer: Das Reibverhalten von Körnerfrüchten.
Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 6, S. 213/19.
- [4] Scherer, R. u. H.D. Kutzbach: Das Festigkeitsverhalten des Maiskorns.
Grundl. Landtechnik Bd. 28 (1978) Nr. 6, S. 229/34.
- [5] Scherer, R. u. H.D. Kutzbach: Die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Körnerfrüchten.
Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 1, S. 21/28.
- [6] Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach: Einfluß thermischer Vorbehandlung auf die statische Festigkeit von Maiskörnern. Teil 1: Schrifttumsübersicht, Grundlagen und Methoden.
Grundl. Landtechnik Bd. 31 (1981) Nr. 5, S. 171/78.
- [7] Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach: Einfluß thermischer Vorbehandlung auf die statische Festigkeit von Maiskörnern. Teil 2: Versuchsergebnisse und Diskussion.
Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 1, S. 8/12.
- [8] •Mohsenin, N.N.: Physical properties of plant and animal materials. 2. Aufl.
New York, London, Paris: Gordon u. Breach 1970.
- [9] Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach: Young's modulus dependent on deformation velocity.
ASAE-Paper No. 82-3055, 1982.
- [10] White, R.K.: Swelling stress in the corn kernel as influenced by moisture sorption.
M.S. thesis, Penn. State Univ., University Park, Pa. 1966.
- [11] Kozma, H. u. H. Cunningham: Tables for calculating the compressive surface stresses and deflections in the contact of two elastic bodies whose principal planes of curvature do not coincide.
J. Industr. Math. Bd. 12 (1962) S. 31/39.
- [12] Shelef, L. u. N.N. Mohsenin: Effect of moisture content on mechanical properties of shelled corn.
Cereal Chemistry Bd. 46 (1969) S. 242/53.
- [13] Arnold, P. u. N.N. Mohsenin: Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape.
Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 1, S. 78/84.

Fahrerinformation als Hilfsmittel der Optimierung beim Einsatz von Ackerschleppern

Von Gerhard Jahns, Hermann Speckmann und
Rudolf Möller, Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft,
Braunschweig-Völkenrode

DK 631.372:681.518

Vorbedingung für die Wirtschaftlichkeit des Schleppereinsatzes ist die möglichst weitgehende Ausnutzung der Schlepperleistung. Fahrerinformationssysteme sollen die ausschlaggebenden Betriebsgrößen ermitteln und die damit verbundene Information so aufbereiten, daß dem Fahrer während des Schleppereinsatzes die Wahl und Einstellung der optimalen Betriebsbedingungen erleichtert wird.

Hier wird berichtet über die Möglichkeiten, die aktuelle Motorleistung zu ermitteln und in einer für den Fahrer nützlichen Form auf dem Display eines Fahrerinformationssystems darzustellen. Aus dem Vergleich des aktuellen Motorbetriebspunktes mit einem vergleichbaren Punkt bei optimalem Zustand des Motors sind gezielte Wartungshinweise zu gewinnen. Die Berechnung und Darstellung der Betriebspunkte für den nächsthöheren bzw. nächstniedrigeren Gang liefern zuverlässige Informationen zur Gangwahl.

Dr.-Ing. G. Jahns und Dipl.-Ing. H. Speckmann sind wiss. Mitarbeiter, Dipl.-Ing. R. Möller ist Versuchingenieur am Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

1. Einleitung

Eine optimale landwirtschaftliche Produktion ist das Ergebnis eingehender Planung und daran ausgerichteter optimaler Erledigung der einzelnen Arbeitsvorgänge. Die Planung nutzt schon seit längerem die Leistungsfähigkeit rechnerunterstützter Optimierungsverfahren, ebenso wie für eine optimale Durchführung spezieller komplexer Arbeitsverfahren, z.B. Mähdreschen oder Pflanzenschutz, elektronische Systeme zur Regelung und Überwachung eingeführt sind. Für die am häufigsten und vielseitigsten eingesetzte landwirtschaftliche Maschine, den Ackerschlepper, steht die Entwicklung geeigneter elektronischer Überwachungs- und Informationssysteme, die einen optimalen Einsatz der unterschiedlichen Schlepper-Gerät-Kombinationen ermöglichen, erst am Anfang. Von einer solchen Anwendung der Mikroelektronik in der Landtechnik ist aber eine Verringerung des Aufwandes an Betriebsmitteln, eine Verbesserung der Arbeitsqualität, eine Verminderung von Verlusten wie auch eine Entlastung des Fahrers bei der Arbeitsdurchführung zu erwarten.

Besonders unter dem Aspekt der Arbeiterleichterung ist von einem Fahrerinformationssystem zu fordern, daß es den Fahrer nicht mit einer Flut von Informationen überhäuft, sondern ihm durch Auswahl und Vorverarbeitung wenige, aber gezielte und nur die für die augenblickliche Tätigkeit relevanten Informationen – übersichtlich dargestellt – liefert.